

鑄塊の凝固組織に関する研究

著者	鈴木 章
号	174
発行年	1972
URL	http://hdl.handle.net/10097/11123

氏 名（本籍）	すずき あきら 鈴 木 章 （兵庫県）
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 第 1 7 4 号
学位授与年月日	昭和 4 7 年 1 1 月 1 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最 終 学 歴	昭和 2 2 年 9 月 東北帝国大学工学部金属工学科卒業
学 位 論 文 題 目	鑄塊の凝固組織に関する研究

（主査）

論 文 審 査 委 員	教授 大平 五郎 教授 須藤 一
	教授 西沢 泰二

論 文 内 容 要 旨

1 本研究の目的

鋼は他の合金に比べて、生産量が多くしかも大型の製品が要求されるので、鋼塊も大きくその凝固が問題になることが多い。また、近年製鋼工程の中で、もっとも進歩のおくれていた造塊の分野に連続鑄造法が導入されたが、この方法は普通の造塊法に比較して、冷却条件を変化させて凝固をコントロールすることが容易であるために、鑄塊の品質との関連でその凝固が問題になっている。

このような状況の下で、鋼塊の凝固条件を知る方法が要望されているが、サルファープリントやマクロ腐食のような従来の方法ではあまりにも定性的な情報しかえられなかった。最近、凝固過程に関する定量的研究がさかんに行なわれ、組織と凝固条件の関係が明らかにされつつあるの

で、これらの基礎的研究が実用鋼塊にも適用しうるかどうかについて検討した。すなわち、工業用金属材料の铸塊は大ていの場合、デンドライトで構成されているので、デンドライト組織に着目し、その形態やあらさから凝固条件を求められるかどうかを検討した。

また、铸塊の品質に関係の深い等軸晶帯の形成については、最近いくつかの新しい提案がなされているが、これらの提案の間の関係が明らかなので、A₂およびA₂合金を用いてこれを検討した。

さらに、これらの研究結果を二、三の実際の铸塊に適用し、その有用性を検討した。

2 研究の概要

2-1 デンドライトの2次アームの間隔について

デンドライト組織を定量的に表現する方法として、デンドライトの1次アーム（主軸）の間隔と2次アーム（側枝）の間隔が用いられている。1次アームの間隔は柱状晶帯でなければ測定が困難であり、3次以上の高次アームは限られた凝固条件でしか生成しない。これに対して、2次アームの間隔は比較的広範囲の凝固条件で観察され、柱状・等軸にかかわらず測定することができる。

2次アームの間隔は、凝固温度範囲の平均冷却速度に依存するということが知られており、前述のように利用範囲も広いので、まず2次アームの間隔について検討した。従来の研究では2次アームの間隔におよぼす組成の影響が明らかなので、炭素鋼、Cr-Mo鋼、25Cr-20Niステンレス鋼について、一端冷却铸塊を用いて2次アームの間隔と冷却速度の関係を求め、炭素鋼についてはとくにC含有量を0.15～0.90%の間で変化させ、C含有量の影響を検討した。結果は2次アームの間隔 $S_{II}(\mu)$ は冷却速度 $R(^{\circ}C/min)$ に依存し、 $S_{II}=710R^{-0.39}$ （炭素鋼）、 $S_{II}=610R^{-0.36}$ （Cr-Mo鋼）、 $S_{II}=210R^{-0.40}$ （25Cr-20Ni鋼）の関係がえられ、炭素鋼のC含有量の影響は0.15～0.90% Cの範囲では認められなかった。

以上の実験の場合、凝固速度の大きいところでは温度勾配も大きく、凝固速度の小さいところでは温度勾配も小さくなっており、従来の研究では凝固速度および温度勾配の2次アームの間隔への影響が十分に確認されていないので、真空タンマン炉を用い、定常状態でデンドライトを一方向に成長させ、これらの因子の効果をしらべると共に、Fe-C合金でC含有量を0.48～3.72%の間で変化させC含有量の影響を検討した。結果は2次アームの間隔は温度勾配および凝固速度にはよらず、冷却速度に依存することを確認し、Fe-C合金でC含有量の影響として、1.8% Cまでは含有量によって変化しないが、それ以上ではC量の増大とともに急激に小さくなることが観察された。このC量の影響をKattamisらのデンドライト・アームの粗大化モデルによって検討し、比較的よく説明することができた。1.8% C以上で2次アームの間隔が急激に変

変化するのは、凝固温度範囲とC含有量の比 ($\Delta T/C$) の寄与の大きいことを示した。

以上の結果から、原理的には大型の鋳塊に対しても、2次アームの間隔と冷却速度の関係が適用されると考えられるので、Cr-Mo鋼4t実用鋳塊について実験し、一端冷却鋳塊および定常凝固実験でえられた結果が、大型鋳塊にも適用できることを確認した。

2-2 デンドライトの成長形態とその1次アームの間隔について

融液から成長する合金結晶は、成長条件によってその形態を変化することが知られているので、25Cr-20Ni鋼を用いてこれをしらべた。定常状態成長実験により、25Cr-20Ni鋼のセル状組織の生成条件として温度勾配 G ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) と成長速度 V (cm/min) の比、 $G/V=3500$ をえた。また、セル状からデンドライト状への遷移条件およびデンドライトの2次アーム、3次アームの生成も一定の G/V の値でおこることを観察した。セル状からデンドライト状への遷移のところで、側枝のない菱形または十字状断面の柱状のデンドライトの存在を観察した。

次に、これまで研究も少なくあまりはっきりしていないデンドライトの1次アームの間隔と成長条件の関係を25Cr-20Ni鋼、Cr-Mo鋼および炭素鋼について検討し、Fe-C合金でC含有量の影響についてもしらべた。結果は1次アームの間隔は $1/G^{0.4}V^{0.2}$ に比例して変化し、凝固時間あるいは固相増加率(凝固速度)には依存しないことがわかった。また、Fe-C合金で1次アームの間隔はC含有量の増大とともに大きくなわことを観察した。

2-3 純AlおよびAl-Cu合金鋳塊における等軸晶の生成について

鋳塊のマクロ組織は、チル層、柱状晶帯および等軸晶帯の一つまたはそれ以上の部分から成るが、最近等軸晶の生成に対する最近の提案は、等軸晶がそれぞれ核生成するというよりは、鋳塊のどこかで生成した結晶の増殖(multiplication)が主体であるというものが多く、溶湯の流動が重要な役割りを果たと考えられるので、等軸晶生成機構を明らかにするには、溶湯の流動をコントロールして凝固組織を調べることが適当と考え、実験の行ないやすいAlおよびAl合金を用いた。溶湯の流動を阻止するためには、下方から上方への一方向凝固法を用い、注入による流動と熱対流の影響を分離して検討できるような方法を考案した。また、結晶の増殖はその成長形態がデンドライト状でなければ困難であると考えられるので、増殖を起こしにくいものとして純AlとAl-0.2%Cu合金を、増殖しやすいものとしてAl-4%Cu合金を用いた。

ある温度以下の比較的低い温度で注入した鋳塊に生成する微細な等軸晶はチル晶の増殖によるものであることを明らかにした。すなわち、99.99%AlやAl-0.2%Cu合金のように、柱状晶がセル状または側枝のないセルラードエンドライト状のときでも、鋳塊の最外層にはデンドライト状のチル晶が生成し、これが注入流のような比較強い溶湯の流動により増殖して等軸晶のようになる。また、このような機構で等軸晶が生成しないように高温で注入した場合には、柱状晶が

デンドライト状であれば、デンドライトアームの“再溶解”によって等軸晶が生成する。

これらの結果は、等軸晶の起源に対する最近の提案が、すべての結晶の増殖によることを示すもので、増殖をおこすデンドライトの生成場所がことなるということだけで各提案の間には矛盾がなく、条件によっては何れの機構もおこりうるということが明らかになった。

2-4 鋳塊の等軸の組織について

2-3の低温注入した鋳塊の等軸晶は粒状の形態で、Cole and Bollingの報告にある回転振動の下で凝固させた鋳塊の等軸晶と同様の形態であった。このような粒状の等軸晶は実用鋼塊の沈澱晶帯でも観察されるので、測温により凝固過程を確認したA ℓ -4%Cu 鋳塊について、マイクロ組織の観察、サブ組織のあらさの測定を行ない凝固条件との関係をしらべた。とくに低温注入鋳塊の粒状の等軸晶も固液共存時の粗大化が考えられるので、その大きさをデンドライト組織のときの2次アームの間隔と比較して検討した。

等軸晶が生成した場合、鋳塊内部の温度勾配が大きいときには冷却曲線に thermal plateau が認められるが、温度勾配の小さいときにはあらわれず、マイクロ組織もこれによく対応していることを明らかにした。低温注入鋳塊の粒状の等軸晶の大きさ（直径）は、同じ凝固時間に対する2次アームの間隔よりも大きいので、粒状の形態を考慮し“粗大化モデル”によって検討したが、定量的に説明できるまでには至らなかった。

2-5 高圧下凝固鋳塊の組織について

近年機械的性質の向上を意図して加圧下で凝固を行なわせる技術が開発されつつある。常圧下での凝固の組織学的解析法が高圧下凝固の場合にも適用可能であるかどうかを明らかにするため、A ℓ およびA ℓ 合金を高圧下で凝固させ、その組織の生成機構を検討した。

2000Kg/cm²以上の高圧下で凝固させた鋳塊で、Clapeyronの式で予想される凝固点の上昇を確認した。凝固点の上昇によって生じた過冷により、急速加圧鋳塊の微細な等軸晶の核生成が説明された。加圧鋳塊でみられたサブ組織のあいだ等軸晶は、鋳塊上表面デンドライト層からの“showering”により生成したものであることを確認した。また、加圧鋳塊で観察された柱状晶のサブ組織の変化は、温度の大幅に異なる鋳型に注入凝固させた鋳塊の柱状晶のサブ組織の差異と同様に、Gを界面前方ではなく後方の温度勾配とすれば、G/Vの変化で説明することができた。

2-6 連続鋳造鋳塊の鋳造組織におよぼす注入温度の影響

最後に、本研究の一連の成果を連続鋳造鋳塊の解析に適用してみた。連続鋳塊の品質で問題となっているのは中および高炭素鋼の場合に軸心部に発生する空隙や偏析と注入温度の関係である。それで0.6% C鋼の110mm角鋳塊の組織と注入温度の関係を検討した。

注入温度が高いと柱状晶がよく発達し軸心部にパイプを生ずるが、所々にブリッジを形成し、そこでは軸心が正、その周囲は負の偏析を示す部分があり、外側の正常部との境界にV状偏析が観察された。これはブリッジ下方の未凝固溶鋼の凝固収縮による吸引現象により説明しうことを示した。また、注入温度の低いときには微細な等軸晶が生成するが、マイクロ組織や2次アームの間隔などから、この等軸晶は2-3で明らかにしたチル晶の増殖により生成したことを示した。

以 上

審 査 結 果 の 要 旨

鋼は他の合金にくらべて生産量が多く、しかも大型の製品が要求されるため鑄塊も大きくその凝固が問題になることが多い。また近年行なわれている連続鑄造法では、とくに品質との関連でその凝固が問題になってきている。著者は鑄塊のデンドライト組織に注目して、これを手がかりとして凝固過程について定量的な解析を試みたが、これによって凝固組織の観察から凝固条件を知ることができ、さらに凝固条件を制御して処要の凝固組織を得ることを可能にした。本論文はその成果をまとめたもので全編 8 章よりなる。

第 1 章は諸論で、この方面の研究の趨勢と本研究の意図、目的等について述べている。

第 2 章はデンドライトの 2 次アーム間隔についての研究で、一端冷却鑄塊および準定常凝固実験によって各種の鋼を調べ、2 次アーム間隔は凝固温度範囲の平均冷却速度に依存し、温度勾配および凝固速度によらないことを見出している。またこれに対する溶質元素量の影響も検討している。

第 3 章ではデンドライトの成長形態とその 1 次アームの間隔におよぼす成長条件の影響を調べた結果を述べている。他の合金の場合と同様に、鋼についても温度勾配と凝固速度の比によって平面状界面からセル状、デンドライト状に遷移するが、セル状とデンドライト状の間に菱形または十字形断面の側枝のないデンドライトが現われることを見出した。

第 4 章は等軸晶の生成についての研究で、微細な等軸晶はチル晶の増殖あるいはデンドライトの再溶解によって生成することを確認している。

第 5 章では鑄塊における等軸晶の生成機構を熱分析、サブ組織の検討から追究していったが、この結果も前章の結論を支持することになった。

第 6 章は高圧下での凝固鑄塊に現われる特殊な組織についての検討結果である。

第 7 章では連続鑄造鑄塊について、注入温度による凝固過程の違いや、偏析の度合を調べた結果を記している。

第 8 章は総括である。

以上要するに、本論文は複雑な現象である鑄塊の凝固過程を定量的に研究したもので、ここに得られた新知見は金属工学に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。